



*The computer system "ProLIT-1c", intended for modeling of the casting molds filling process, in which cluster technologies of super-computer SKIF calculations are situated, is considered. The possibilities of software "ProLIT-1c" are illustrated at the example of the industrial castings, produced in foundry.*

А. Н. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «ПРОЛИТ-1С» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НА КЛАСТЕРНЫХ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА СКИФ

Разработка систем автоматизированного моделирования (САЕ-системы) литейных процессов является одной из сложнейших научно-технических задач, решение которой определяющим образом влияет на качество изделий литейных предприятий. Как известно, темпы развития производства отливок существенно зависят от использования программных средств, используемых при разработке технологического процесса. Возможности компьютерного моделирования для процесса заполнения форм и кристаллизации металла значительно повышают уровень автоматизации при разработке технологического процесса, что минимизирует материальные издержки, связанные с дальнейшей промышленной апробацией и внедрением технологических решений на производстве.

Основным вопросом при разработке технологического процесса является выбор типа и размеров литниково-питающей системы, которая влияет на процесс кристаллизации и свойства отливки. Как правило, конструктор и технолог разрабатывают литниковую систему в условиях неопределенности физической картины течения расплава и его кристаллизации в форме. При этом в основном используется метод прототипирования, который не позволяет оптимизировать литниковую систему. Это приводит к тому, что заводские литниковые системы имеют конфигурацию и размеры, далекие от оптимальных, что вызывает повышенный расход металла и энергетических ресурсов при изготовлении отливки.

Известно, что литниковая система оказывает влияние и на качество отливки, так как она может быть причиной образования различного рода дефектов (газовые дефекты, засоры, шлаковые включения, усадочная пористость, недоливы, спаи и т.д.). Поэтому неверный выбор литниковой системы влияет на качество получаемых отливок.

Для решения задач, связанных с разработкой технологического процесса для отливок различного назначения, предлагается система автоматизированного моделирования «ПроЛит-1», которая внедрена и используется на ОАО «МЗОО» [1]. Эта первая белорусская компьютерная система, направленная на оптимизацию процесса литья, была разработана на механико-технологическом факультете Белорусского национального технического университета. Математическое ядро системы «ПроЛит-1» составляют клеточно-автоматные правила моделирования, включающие численные схемы, основанные на дифференциальных уравнениях Навье–Стокса, Фурье–Киргофа, уравнении неразрывности, уравнении состояния. Как все зарубежные системы подобного типа (Procast, MagmaSoft, AF Solid, WinCast, 3d-Flow и т.д.), «ПроЛит-1» имеет импорт геометрии, позволяющий вводить изображение отливки и литниковой системы в формате STL. Трехмерное изображение объекта (форма, стержень, отливка, холодильники и т.д.) с помощью встроенного генератора сетки разбивается на элементы. Каждому элементу присваиваются теплофизические характеристики (теплоемкость, теплопроводность, плотность, вязкость и т.д.), которые обрабатываются с помощью методов, реализованных в математическом ядре.

Компьютерная система «ПроЛит-1» позволяет увидеть динамику процесса течения металла в литниковой системе и форме, а также осуществлять визуализацию полей температуры, пористости, скоростей, давлений в любой плоскости отливки и в любой момент времени. Возможен анализ температуры во времени в любой точке «отливка–форма–литниковая система», т.е. имитация работы термопары. Визуализация дефектов усадочного происхождения проводится на основе дискретного поля плотностей. Анализируя величину скоростных потоков расплава в форме, можно

оценить вероятность размыва форм для различных участков, а также образование дефектов типа “недолив” и “спай”.

Анализ применения компьютерных систем моделирования для решения задач, связанных с оптимизацией технологического процесса, показывает, что временные затраты на проведение расчетов при использовании компьютерных средств могут быть значительными. В первую очередь это зависит от дискретности сетки, используемой для описания геометрии отливки и литниковой системы. Причем это касается всех компьютерных систем без исключения, которые ориентированы на персональный компьютер и основанных как на методе конечных разностей, так и методе конечных элементов. Последний метод имеет некоторые преимущества за счет снижения числа элементов по пространству, однако временной шаг расчета остается критическим и для систем, использующих метод конечных элементов. Особенно актуальна эта задача для отливок сложной пространственной конфигурации, которые и являются «проблемными» на производстве. На рис.1 приведен простейший вариант матрицы планирования эксперимента только для трех варьируемых факторов технологического процесса, показывающий число расчетных вариантов для отливки. Если положить, что рассчитывается только пять литниковых систем, то число вариантов моделирования может быть равно 40 при трех технологических факторах. Из этих оценок следует, что процесс моделирования с целью оптимизации и выбора лучшего решения может протекать месяцы. Более отчетливо видна проблема, если учесть, что номенклатура среднего литейного предприятия может составлять 300–400 отливок в год.

Таким образом, моделирование литейных процессов связано с большой размерностью сетки моделируемого объекта, которая изменяется во времени. Это приводит к тому, что моделирование процесса заполнения формы и кристаллизации отливки сложной пространственной конфигурации может затягиваться на сотни часов машинного времени. Для эффективного применения компьютерного моделирования к сложным объектам литейного производства необходимо применять высокую размерность сетки (миллионы сеточных элементов), что вызвано пространственной сложностью отливок и применяемых технологических элементов (форма, литниковая система, прибыли). Оптимизация технологии должна проводиться в широких интервалах варьирования как по физическим параметрам материалов, так и по пространственной конфигурации элементов литейного объекта, что также требует больших затрат машинного времени. Динамический пересчет сетки на каждом шаге итерации делает время выполнения этого шага критическим для всей компьютерной системы. Естественный способ по-

№ п/п	Варианты литниковых систем	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	B1	+1	+1	+1
		-1	-1	+1
		+1	-1	+1
		-1	-1	+1
		+1	+1	-1
		-1	-1	-1
		+1	-1	-1
		-1	-1	+1
2	B2	+1	+1	+1
		-1	-1	+1
		+1	-1	+1
		-1	-1	+1
		+1	+1	-1
		-1	-1	-1
		+1	-1	-1
		-1	-1	+1
...	...	...	...	...
5	B5	-//-	-//-	-//-

$X_1$  – температура заливки;  $X_2$  – температура формы;  $X_3$  – положение плоскости разбема.

Уровень сложности отливки	Время расчета	
	часы	дни
1	40•120 = 4800	200
2	40•20 = 800	33
3	40•5 = 200	8

Рис. 1. Варианты моделируемой технологии для одной отливки при трех варьируемых факторах

вышения скорости моделирования – распараллеливание процессов вычислений с использованием кластерных мультипроцессорных систем.

Все это делает актуальным создание программного обеспечения для моделирования литейных процессов, адаптированного под мультипроцессорные технологии. Создание программного обеспечения для моделирования литейных процессов, адаптированного под мультипроцессорные технологии, является целью настоящей работы.

**Структура КС «ПроЛит-1с».** С 2005 г. были начаты работы по созданию программного обеспечения «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер СКИФ для решения технологических задач литейного производства. На рис. 2 показана структура компьютерной системы (КС) «ПроЛит-1с». Входными данными в КС «ПроЛит-1с» являются литниковая система с отливкой в формате \*.stl и файл формата \*.prt, в котором хранятся данные, необходимые для импорта объекта моделирования и расчета процессов движения расплава, его охлаждения и кристаллизации. Математические функции в КС «ПроЛит-1с» распараллелены в отличие от «ПроЛит-1», что обеспечивает уменьшение времени расчета технологического процесса в несколько раз в зависимости от степени сложности рассчитываемого объекта. Все расчеты предполагается проводить на суперкомпьютере СКИФ, а результаты в виде файлов передавать по технологиям интернета. Входные данные передаются от рабочего места пользователя на суперкомпьютер

по сети интернет. КС «ПроЛит-1с» состоит из модуля структуры данных, содержащего информацию о расположении переменных в памяти ЭВМ, и методов доступа к этим переменным; модуля создания сеточного объекта; модулей расчета движения расплава и расчета охлаждения и кристаллизации, содержащих процедуры и функции, необходимые для расчета значений скорости, плотности, давления и температуры, модуля формирования файла результатов \*.rst. Модуль структуры данных обеспечивает комплексное взаимодействие всех модулей, предоставляет доступ к параметрам состояния, сохранение структуры и переменных в файл и чтение их из файла, сервисное обслуживание структуры (выделение и оптимизацию памяти, оптимизацию скорости доступа, проверку границ пространства и исключительных ситуаций).

Результаты моделирования сохраняются в процессе расчета с заданным шагом в файл результатов \*.rst. Этот файл после окончания моделирования передается по сети интернет на локальный компьютер, где может быть просмотрен с помощью визуализатора.

**Визуализация процесса.** Числовое значение компоненты состояния клетки ассоциируется с некоторым цветом. КС предусматривает также вывод черно-белых изображений, когда цвет плавно меняется от черного к белому. Таким образом, можно изобразить какое-либо сечение модели по определенному параметру среды и визуально оценить значения этого параметра одновременно по всем элементам данного сечения. Пользователь имеет возможность вывести на экран сразу несколько окон, отображающих различные параметры среды для одного сечения. На рис. 3 показан пример просмотра типов клеток, температуры в сечении и пространственное распределение температур. Если пользователь подведет курсор к некоторой точке изображения, то в окне значений будут отображены координаты точки и значения параметров состояния в данной клетке.

Подсистема трехмерной визуализации пространственно распределенных параметров моделируемого объекта предназначена для визуальной оценки качества заполнения модельной формы с точки зрения образования недоливов и спаев, давая представление о процессе движения жидкого металла, его охлаждении и структурных превращениях. Она выполняет следующие функции:

- отображает трехмерный объект, состоящий из отливки и литниковой системы;

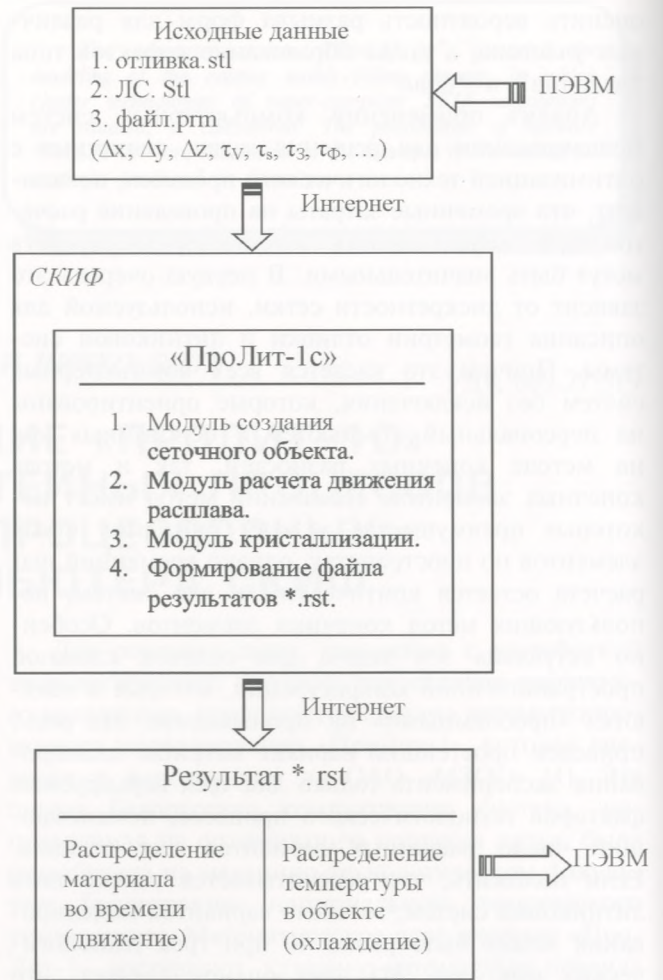


Рис. 2. Схема работы с компьютерной системой «ПроЛит-1с» для суперкомпьютера СКИФ

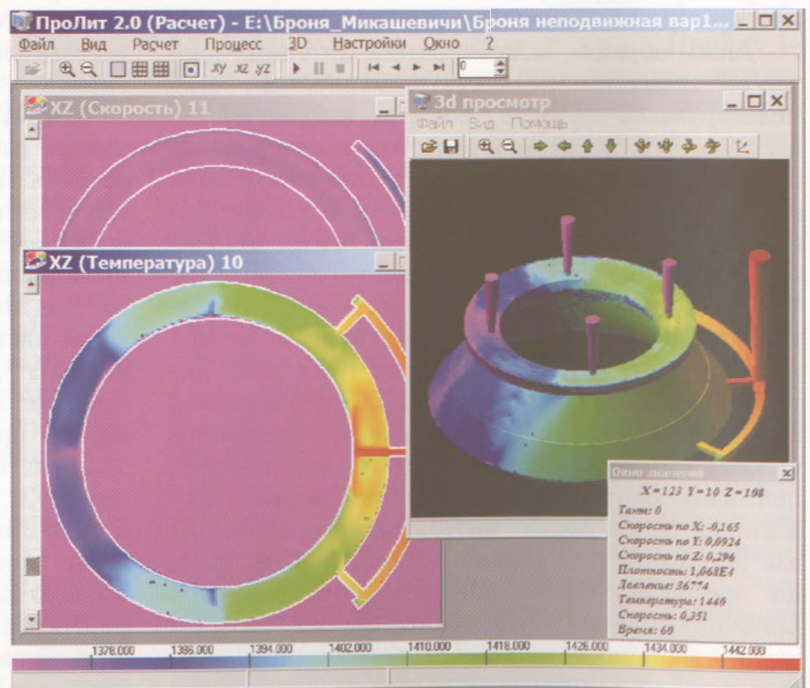


Рис. 3. Температурное поле отливки «Броня», изготавливаемой на РУПП «Гранит», рассчитанное в компьютерной системе «ПроЛит»



- отображает процесс движения жидкого металла в форме в автоматическом режиме;
- позволяет просматривать любой сохраненный момент движения расплава, просматривая кадры в ручном режиме;
- позволяет просматривать области закристаллизовавшегося металла;
- отображает пространственно распределенное поле температур на момент окончания заливки;
- позволяет вращать объект в трех направлениях в любой момент времени.

Подсистема для визуализации отображает файлы формата \*.rst с помощью технологии OpenGL. Подсистема предназначена для работы в среде Windows. Это означает, что файлы \*.rst, полученные в результате моделирования на суперкомпьютере, должны быть скопированы на локальный компьютер перед просмотром. Пользователь может с помощью данной подсистемы оценить характер заполнения формы расплавленным металлом, увидеть места образования таких литейных дефектов, как недолив и спай.

Часто в качестве результатов моделирования требуется получить зависимость некоторого параметра состояния клетки от времени. Разработанная КС позволяет вывести графики изменения любого параметра произвольного элемента модели (рис. 4). Для этого используются данные сохраненных ранее результатов моделирования.

**Режимы работы КС «ПроЛит-1с».** Существуют следующие режимы:

- работа с файлами собственного формата;
- импорт файлов отливок в формате твердотельного моделирования (\*.stl);
- расчет течения охлаждающегося расплава;
- запись в файл промежуточных моментов расчета;
- просмотр любого сечения отливки;
- визуализация динамики течения жидкости;
- просмотр полей скоростей и температур;
- вывод графиков зависимостей скорости, температуры, плотности, давления от времени в любой точке отливки.

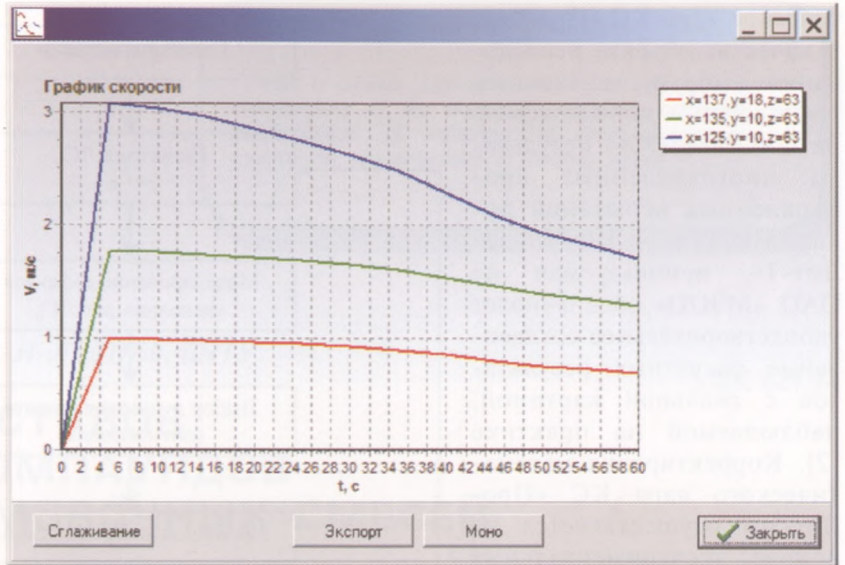


Рис. 4. Расчетные зависимости фильтрованных значений скорости течения  $V$  от времени для трех точек промышленной отливки «Броня»

В настоящее время математические модели разрабатываемой системы «ПроЛит-1с» проходят апробацию на отливках РУПП «Гранит». На рис. 3–5 показаны фрагменты моделирования процесса заполнения и кристаллизации отливки «Броня». На основе моделирования течения расплава разработано несколько вариантов литниковых систем, которые в дальнейшем предполагается апробировать в условиях производства.

Параллельно с разработкой программного обеспечения проводится промышленная апробация численных схем и моделей, составляющих матема-

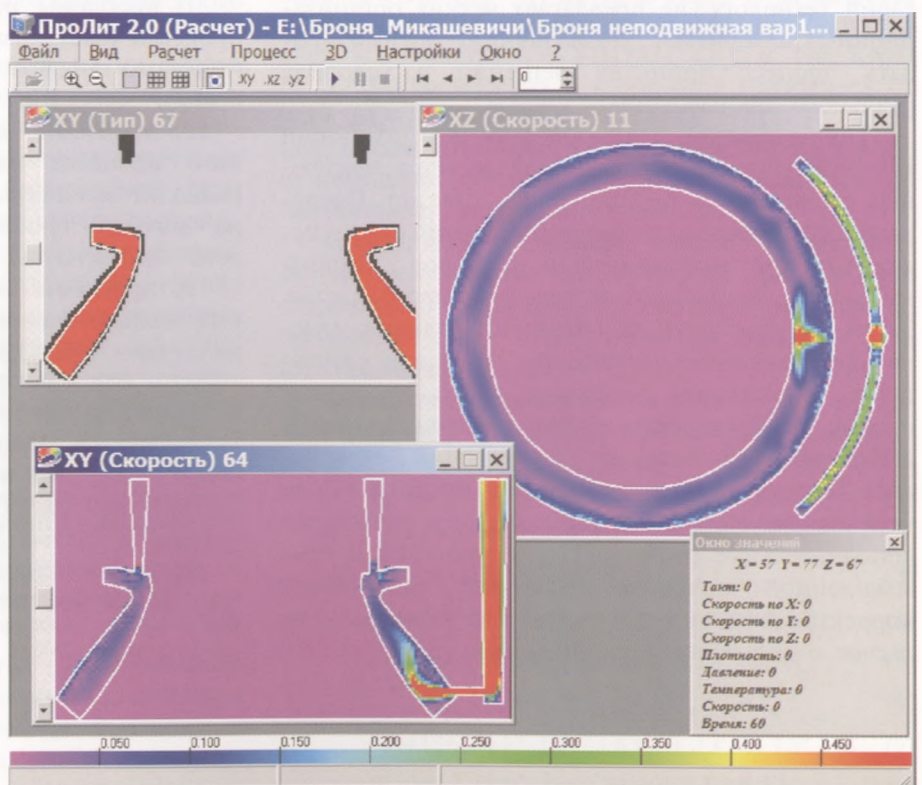


Рис. 5. Внешний интерфейс компьютерной системы «ПроЛит» с результатами моделирования скоростных течений отливки «Броня», изготавливаемой на РУПП «Гранит»

тическое ядро КС «ПроЛит». В качестве объекта исследования выбраны отливки и технологии, используемые на ОАО «МЗОО». Результаты многочисленных промышленных испытаний показывают, что КС «ПроЛит-1», используемая на ОАО «МЗОО» обеспечивает удовлетворительное согласование расчетных результатов с реальной картиной, наблюдаемой на практике [2]. Корректировка математического ядра КС «ПроЛит-1с» осуществляется на основе экспериментальных данных по отливкам различной пространственной конфигурации с привлечением версии «ПроЛит-1». Опыт использования последней компьютерной системы показывает, что она должна быть включена в цепочку технологического процесса предприятия естественным образом. А это очень важно, так как технологи литейных цехов работают по своим алгоритмам, часто далеким от оптимальных. Следует отметить, что наука, часто давая инструментарий технологю, не предлагает четких организационных алгоритмов, позволяющих оптимизировать процесс принятия решений в условиях реального производства.

Таким образом, для разработки и оптимизации технологического процесса предлагается следующая схема работы с «ПроЛит-1с» (рис. 6). Первоначально выбираются варианты литниковых систем и группа технологических факторов, которыми можно варьировать в условиях производства. Затем для построенной геометрии отливки моделируются выбранные варианты. На основе результатов вычислений, используя метод экспертных оценок, осуществляется выбор наилучшего технологического варианта, обеспечивающий бездефектное виртуальное изготовление отливки. Если необходимо изменение варианта, то проводятся дополнительные расчеты. После проведения промышленной апробации возможна дальнейшая корректировка технологических вариантов и их расчет с дальнейшей оптимизацией.

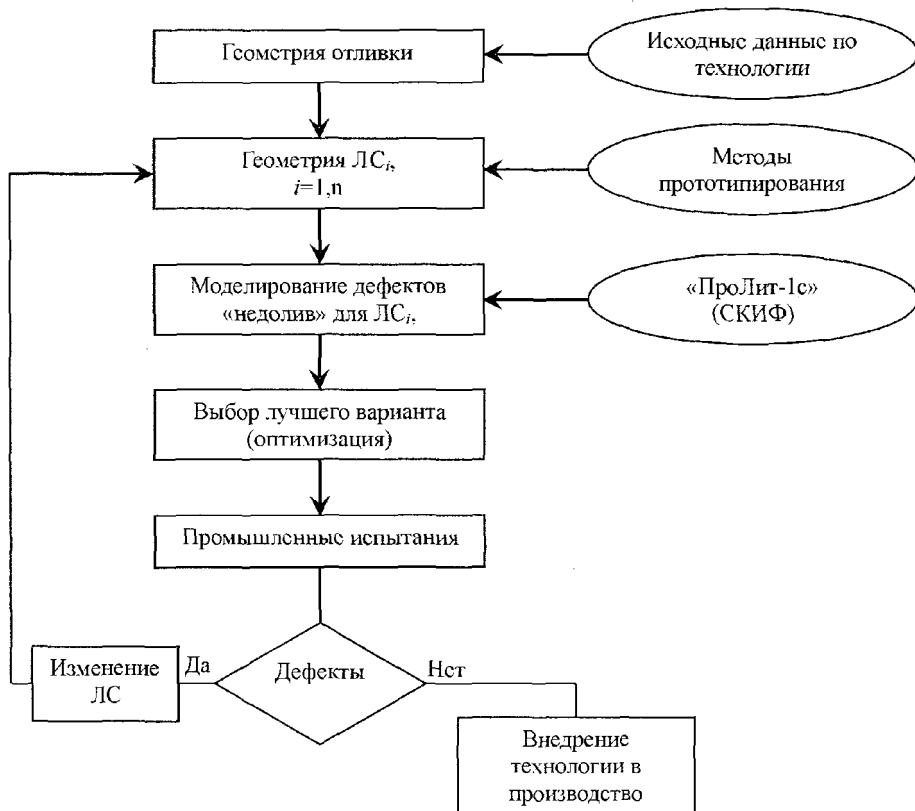


Рис. 6. Предлагаемая схема разработки технологического процесса получения отливок на литейном предприятии

Таким образом, с помощью метода компьютерного моделирования технологического процесса и различных режимов компьютерной системы «ПроЛит-1с» можно очень быстро анализировать:

- 1) проблемы используемого технологического процесса (визуализация “болевых” точек технологического процесса и рекомендации по снижению брака);
- 2) проблемы разрабатываемого технологического процесса на этапе проектирования (это позволит значительно сэкономить время и деньги на доводку технологической оснастки и “увидеть” дефекты на стадии проектирования);
- 3) проблемы и варианты принципиально новых технологических решений, которые находятся на стадии обсуждения.

### Литература

- 1 Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. и др. Система автоматизированного моделирования «ПроЛит-1» и опыт ее использования на Минском заводе отопительного оборудования // Литье и металлургия. 2004. Спецвыпуск. С. 117–123.
- 2 Чичко А.Н., Лукашевич Ф.С., Лихоузов С.Г., Чичко О.И. Расчетное и экспериментальное исследование характеристик движущегося расплава // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 3. С. 1–6.